

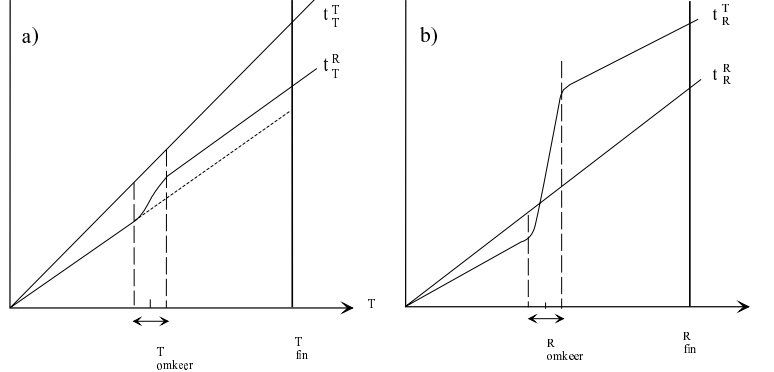
W.M. de Muynck

Beschrijft de relativiteitstheorie slechts de verschijnselen (empiristische interpretatie) of de werkelijkheid achter de verschijnselen (realistische interpretatie)? Velen van ons zijn opgegroeid met een positief (positivistisch) antwoord op de eerste mogelijkheid. Toch lijkt de (klassieke) natuur sterker dan de positivistische leer: voorzichtige formuleringen in termen van verschijnselen kom je zelden tegen in de literatuur; in de leerboeken wordt de relativiteitstheorie meestal gepresenteerd als no-nonsense beschrijving van de (microscopische) werkelijkheid, analoog aan de presentatie van de klassieke mechanica. Is dit terecht? Het is de bedoeling van dit artikel om aan de hand van een aantal voorbeelden uit de relativiteitstheorie enige twijfel te zaaien met betrekking tot het positieve (anti-positivistische) antwoord op de tweede mogelijkheid, zonder daarbij overigens in twijfel te trekken dat de relativiteitstheorie de verschijnselen adequaat beschrijft.

De tweelingparadox

De tweelingparadox heeft betrekking op twee waarnemers, T en R , waarvan de eerste permanent in rust is in een inertiaalstelsel, terwijl de tweede op reis gaat. Bij thuiskomst blijkt R jonger te zijn dan T . Het probleem heeft voor wat betreft dit inmiddels empirisch geverifieerde feit zijn paradoxale karakter verloren sinds we ons realiseren dat waarnemer R geen *inertiale* waarnemer kan zijn [1]. Toch blijft het voorbeeld instructief als we niet alleen kijken naar het eindresultaat, maar ook naar de manier waarop dit tot stand komt. Voor het gemak aannemend dat R met vliegende start vertrekt en met vliegende finish aankomt, is R gedurende het overgrote deel van zijn reis inertiaal, en blijft het niet-inertiale deel beperkt tot een kort tijdsinterval waarin hij zijn snelheid van richting laat omkeren. In fig. 1 is aangegeven hoe het uiteindelijke leeftijdsverschil van de tweelingen, zoals waargenomen door T resp. R , tot stand komt. Daarbij is van belang dat R en T gedurende het grootste deel van de tijd gelijkwaardig zijn. Dit heeft tot gevolg dat de oplossing van de paradox niet simpel volgt uit de veronderstelling “dat bewegende klokken langzamer zouden lopen”. Gedurende de inertiale fase loopt T 's klok net zoveel achter ten opzichte van die van R als omgekeerd. De uiteindelijke overeenstemming over het eindresultaat kan alleen worden verkregen doordat de reciprociteit niet van toepassing is tijdens het omkeerproces. Wat er dan gebeurt, is dat T 's klok gedurende dit proces ten opzicht van de klok van R een soort van tussensprint maakt, waardoor de eerste voldoende voorsprong verkrijgt dat er, ondanks een inhaalproces door R 's klok gedurende de inertiale fase, nog voldoende voorsprong overblijft om het uiteindelijke resultaat te kunnen verkrijgen (cf. fig. 1b).

Ik heb me hier met opzet bediend van het spraakgebruik van de meeste leerboeken, die het voorzichtige “ R ziet de klok van T achter lopen ten opzichte van zijn eigen klok”



Figuur 1: a): Klokken van T en R zoals waargenomen door T ; b): Idem zoals waargenomen door R .

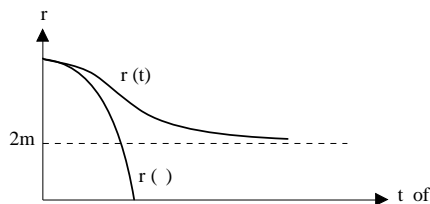
vervangen door het kortere “ T ’s klok loopt achter ten opzichte van die van R ”¹. Voorzover die laatste formulering slechts wordt gebruikt als een verkorte formulering van de eerste, is er niet zoveel aan de hand. We komen echter in de problemen als we de kortere formulering letterlijk nemen, en de relativistische beschrijving gaan interpreteren als een beschrijving van het werkelijke gedrag van klokken in plaats van als een beschrijving van aan klokken gedane waarnemingen: in dat geval zou R ’s klok vanwege de reciprociteit tussen T en R gedurende de inertiale periode zowel achter als voor moeten lopen ten opzichte van die van T .

Weliswaar is het mogelijk hier een post-moderne mouw aan te passen door ervan uit te gaan dat elke waarnemer zijn eigen werkelijkheid heeft, en dat die werkelijkheden niet met elkaar in overeenstemming hoeven te zijn. Ik denk echter dat zo’n “oplossing” verstaat van de dagelijkse praktijk van de natuurkunde, en ook niet de meest natuurlijke is. Een voor een fysicus veel meer voor de hand liggende oplossing is, dat verschillen in waarneming van eenzelfde fysische gebeurtenis door verschillende waarnemers te verklaren zijn door *verschillen in de waarnemingsmethode*: het waarnemingsproces waarmee R de klok van T waarneemt, verschilt van het waarnemingsproces waarmee T diezelfde klok observeert. Op deze wijze geformuleerd, is reciprociteit een gevolg van de gelijkwaardigheid van de waarnemingsprocessen waarmee R de klok van T , en T de klok van R observeert. Deze gelijkwaardigheid gaat verloren doordat tijdens de niet-inertiale periode van R diens waarnemingsproces zodanig verandert, dat hij de klok van T een tussensprint *ziet* maken. De veronderstelling dat dit gedrag van T ’s klok “werkelijk” plaatsvindt in de werkelijkheid van R , terwijl er in de werkelijkheid van T op het gedrag van diens klok geen enkel effect is te bespeuren van de versnelling die R ondergaat, lijkt fysisch niet erg acceptabel. Veruit de meest redelijke oplossing is dat deze versnelling het waarnemingsproces van R modificeert, waardoor R de klok van T op een andere manier gaat waarnemen. Voor de interpretatie van de relativiteitstheorie impliceert dit dat de relativistische beschrijving geen betrekking heeft op de werkelijkheid als zodanig, maar op de *waarneming* van die werkelijkheid, met andere woorden: op de verschijnselen.

Radiale val in een zwart gat

Als tweede voorbeeld bekijken we de radiale val van een object in een zwart gat. De

¹Een gunstige uitzondering is de zorgvuldige behandeling van de tweelingparadox in [2], p. 28.

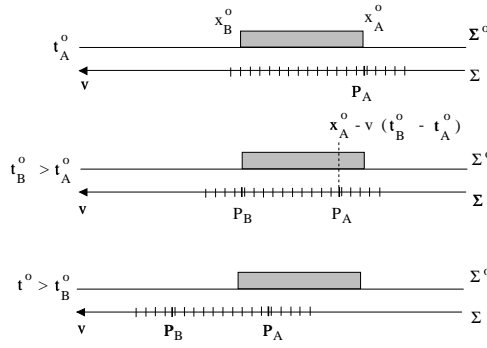


Figuur 2: Radiale coördinaat zoals gemeten door een statische resp. meebewegende waarnemer.

oplossing hiervan is exact bekend ([3], p. 222). Voor ons van belang is het in fig. 2 weergegeven kwalitatieve verschil tussen de radiale afstand als functie van de coördinaattijd t resp. van de eigentijd τ : in termen van t overschrijdt het object de Schwarzschildstraal $r = 2m$ nooit, maar benadert het deze asymptotisch voor grote t ; in termen van de eigentijd wordt de Schwarzschildstraal in een eindige tijd overschreden. De vraag doet zich dan natuurlijk voor: wat gebeurt er in werkelijkheid, wordt de Schwarzschildstraal nu wel of niet overschreden?

Ook hier zou een post-modern antwoord kunnen worden gegeven, namelijk dat er meerdere werkelijkheden zijn, corresponderend met verschillende coördinatenstelsels. De werkelijkheid in het lokale inertiaalstelsel waarin het object in rust is, is dan een andere dan die van het stelsel van de Schwarzschildcoördinaten. Voor een post-modernistisch denker bestaat er niet één unieke werkelijkheid waarin de gebeurtenissen zich afspelen, en is er daarom niets op tegen dat het object in de ene werkelijkheid wel naar binnen valt, terwijl het dat in de andere niet doet. Ook hier geeft echter de tussenschakeling van het waarnemingsproces tussen object en waarnemer de mogelijkheid tot een meer fysische oplossing. Informatie kan door middel van lichtsignalen worden overgebracht van het object naar een ten opzichte van de Schwarzschildmetriek statische waarnemer. Deze lichtsignalen moeten optornen tegen de door het zwarte gat uitgeoefende zwaartekracht, en hebben meer tijd nodig naarmate het object de Schwarzschildstraal dichter nadert (aan de Schwarzschildstraal is de radiale lichtsnelheid zoals gemeten in de Schwarzschildcoördinaten gelijk aan nul). Wederom is bij deze interpretatie van de relativiteitstheorie de relativistische beschrijving geen weergave van wat er in de werkelijkheid gebeurt, maar van een met fysische middelen (bijvoorbeeld lichtsignalen) uitgevoerde waarneming. De relativistische gebeurtenis (\mathbf{x}, t) betekent dus niet dat er een deeltje op tijdstip t ter plaatse \mathbf{x} “is”, maar \mathbf{x} en t hebben betrekking op de markeringen van meetlatten en klokken waarmee een waarnemer bepaalde informatie registreert die hij interpreteert als evidentie voor de aanwezigheid van een object. Zo’n interpretatie noemen we een *empiristische* interpretatie van de relativiteitstheorie, omdat deze markeringen kunnen worden geassocieerd met “verschijnselen”. Het idee dat een object ten eeuwigden dage blijft vallen in de richting van de Schwarzschildstraal zonder deze ooit te overschrijden, is een gevolg van een *realistische* interpretatie, waarin de theorie geacht wordt de werkelijkheid zelf te beschrijven.

Lengtemeting in de speciale relativiteitstheorie



Figuur 3: Meetprocedure van de lengte van een bewegend object, zoals waargenomen door een met het object meebewegende waarnemer.

Als derde voorbeeld bekijken we een lengtemeting door een bewegende waarnemer. Waarnemer R in inertiaalstelsel Σ meet de lengte van een ten opzicht van T in Σ° in rust zijnd object door in het voorbijgaan dit object op zijn eigen meetlat af te passen. Het is interessant om dit meetproces eens te beschrijven in het coördinatenstelsel Σ° (cf. fig. 3). Daartoe gebruiken we de Lorentztransformatie tussen Σ en Σ° :

$$x^\circ = \gamma(x - vt), \quad t^\circ = \gamma(t - vx/c^2), \quad \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}.$$

Met behulp hiervan vertalen we de markeringsgebeurtenissen (x_A, t_A) en (x_B, t_B) (met $t_A = t_B$) voor de uiteinden A en B van het object in termen van het stelsel Σ° . Als $x_A(x_B)$ de coördinaat van het punt $P_A(P_B)$ is die R op zijn meetlat heeft gemarkeerd bij het passeren van punt $A(B)$, dan krijgen we:

$$\begin{aligned} x_A^\circ &= \gamma(x_A - vt_A), \quad t_A^\circ = \gamma(t_A - vx_A/c^2), \\ x_B^\circ &= \gamma(x_B - vt_B), \quad t_B^\circ = \gamma(t_B - vx_B/c^2). \end{aligned}$$

Hieruit volgt direct het met de Lorentzcontractie overeenstemmende antwoord $x_A - x_B = \gamma^{-1}(x_A^\circ - x_B^\circ)$, dus deze meetprocedure lijkt bruikbaar binnen het toepassingsgebied van de relativiteitstheorie. Toch is het enigszins verrassend om te zien hoe deze meetprocedure er in Σ° uitziet. Het verrassende is *niet* dat $t_A^\circ \neq t_B^\circ$ (relativiteit van de gelijktijdigheid). Voor de procedure van fig. 3 is gemakkelijk na te gaan dat $t_B^\circ > t_A^\circ$. Dit betekent dat in de beschrijving van T eerst punt A wordt gemarkeerd op de meetlat van R , en vervolgens punt B . Wat nu van belang is, is dat gedurende het tijdsinterval (t_A°, t_B°) de meetlat van R met snelheid $-v$ ten opzichte van T en diens object beweegt. Dit betekent dat het punt P_A van R 's meetlat zich op tijdstip t_B° bevindt ter plaatse $x_A^\circ - v(t_B^\circ - t_A^\circ)$.

Zou T een realistische interpretatie van de relativiteitstheorie hanteren, dan zou deze uitkomst nogal alarmerend zijn. Immers, het stuk (P_A, P_B) van R 's meetlat heeft in de beschrijving van T op geen enkel moment T 's object geheel overlapt. T 's beschrijving van R 's meetprocedure zou niet te onderscheiden zijn van de beschrijving van de handelingen van een frauduleuze landmeter die zijn meetlint laat slippen terwijl hij bij het afmeten van een stuk land van A naar B loopt. Op basis van een realistische interpretatie van zijn beschrijving zou T het meetresultaat van R ernstig moeten wantrouwen. Ook hier geldt weer dat een empiristische interpretatie meer recht kan doen aan de goede intenties van R : wat T ziet, behoeft niet hetzelfde te zijn als wat er in werkelijkheid gebeurt. De

empiristische interpretatie gaat ervan uit dat de Lorentztransformatie rekening houdt met de manier waarop informatie in het waarnemingsproces wordt overgebracht van het ene Lorentz-coördinatenstelsel naar het andere.

Discussie

De natuurkunde heeft de bedoeling de fysische werkelijkheid te beschrijven zoals deze is, onafhankelijk van menselijk ingrijpen. Binnen het domein van de klassieke mechanica leek dit onproblematisch: wat men waarneemt lijkt daar goed overeen te stemmen met datgene wat in de werkelijkheid bestaat. Daarom wordt in de klassieke mechanica in het algemeen geen onderscheid gemaakt tussen de verschijnselen en de realiteit. Binnen het domein van de relativiteitstheorie (evenals dat van de quantummechanica [4]) ontmoeten we wat dit betreft problemen. Daar moet onderscheid gemaakt worden tussen wat men waarneemt en wat er is. Einstein's oorspronkelijke formulering van de relativiteitstheorie [5] is in dit opzicht zeer voorzichtig. De Lorentz-contractie wordt geassocieerd met de lengte die wordt *waargenomen* door een bewegende waarnemer met behulp van diens klok en meetlat, en is geen eigenschap van het object als zodanig. Het is echter erg moeilijk om als fysicus strikt empirist te zijn, en te geloven dat de theorie echt geen weergave is van de werkelijkheid achter de verschijnselen. Met name de vier-dimensionale tensor-formulering van de relativiteitstheorie heeft ertoe bijgedragen de waarnemer naar de achtergrond te verdrijven. Weliswaar heeft de tensor voor iedere waarnemer (i.e. in ieder coördinatenstelsel) een andere representatie; echter kan men over de tensor als zodanig proberen te denken als een object dat in de werkelijkheid bestaat. De hierboven gegeven voorbeelden tonen aan dat we hier toch een beetje voorzichtig mee moeten zijn. Hoewel het allesbehalve duidelijk is, op welke manier de waarnemer in het spel betrokken is, is het wel duidelijk dat het zeer problematisch is om, zonder te vervallen tot een postmodern filosofisch standpunt, binnen het toepassingsgebied van de relativiteitstheorie te komen tot een consistent beeld van de werkelijkheid waarin de waarneming geen rol speelt.

Referenties

- [1] B.R.A. Nijboer, H.J. Groenewold, *Ned. Tijdschr. v. Natk.* **25**, 160 (1959).
- [2] B.F. Schutz, *A first course in general relativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [3] R. Adler, M. Bazin, M. Schiffer, *Introduction to general relativity*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, etc., Second edition, 1975.
- [4] W.M. de Muynck, *Synthese* **102**, 293 (1995).
- [5] A. Einstein, *Annalen der Physik* **17**, 891 (1905).